



INSTITUTO FEDERAL
Piauí



PPGEM
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

EMERSON TIAGO DE SOUSA MELO

**USO DE PAPEL KRAFT EM COMPÓSITOS DE CONCRETO: uma alternativa
inovadora e sustentável**

TERESINA

2025

EMERSON TIAGO DE SOUSA MELO

USO DE PAPEL KRAFT EM COMPÓSITOS DE CONCRETO: uma alternativa
inovadora e sustentável

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte
integrante dos requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia de Materiais.
Área de concentração: Caracterização e
Processamento de Materiais
Linha de pesquisa: Tecnologias Ambientais

Orientador: Prof. Dr. Rubens Silva Costa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Melo, Emerson Tiago de Sousa

M528u Uso de papel kraft em compósitos de concreto : uma alternativa inovadora e sustentável / Emerson Tiago de Sousa Melo. - 2025.
52 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2025.

Orientador : Prof Dr. Rubens Silva Costa.

1. Fibra. 2. Papel kraft. 3. compósitos. 4. Cimento. I.Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

EMERSON TIAGO DE SOUSA MELO

USO DE PAPEL KRAFT EM COMPÓSITOS DE CONCRETO: uma alternativa
inovadora e sustentável

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte
integrante dos requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 20 / 05 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rubens Silva Costa (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Gilvan Moreira da Paz
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Leanne Silva de Sousa
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos,
minha noiva, amigos e mestres.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me dá força, vitalidade e discernimento quando eu mais preciso. Agradeço aos meus pais Felipe e Francisca, a minha noiva Denise e aos meus irmãos Thiêgo e Tarciso que deram todo o apoio necessário para que eu chegasse até aqui.

Agradeço aos professores do IFPI do Campus Teresina Central, em especial aos professores Dr. Rubens e Dr. Gilvan, à FIEPI, à PRETEL em especial ao Sr. Barbosa, Francisco Wilson, Marcelo, Wellington, Adriano, Gabrielle e todos os outros os quais não recordo o nome, porém me ajudaram direta ou indiretamente e contribuíram para o alcance deste resultado.

Na natureza, nada se cria, nada se perde,
tudo se transforma.

Antoine-Laurent Lavoisier

RESUMO

A construção civil é um dos setores que mais contribuem para a geração de empregos no Brasil, representando uma parcela expressiva do Produto Interno Bruto (PIB). Em 2024, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o setor apresentou um crescimento de 4,1%, reforçando sua relevância econômica e social. No entanto, esse crescimento vem acompanhado de impactos ambientais significativos, sobretudo pelo elevado consumo de energia e pela geração de resíduos sólidos, como plásticos e papéis provenientes de embalagens de insumos, especialmente o cimento. O descarte inadequado desses materiais tem agravado problemas ambientais urbanos, tornando urgente a busca por soluções mais sustentáveis. Diante dessa realidade, este estudo propõe o reaproveitamento do papel Kraft, oriundo de embalagens de cimento, na produção de concreto, por meio da extração e incorporação de fibras celulósicas. O objetivo central é avaliar o desempenho de concretos modificados com diferentes teores dessas fibras (0,0%, 1,5%, 2,5%, 5% e 10%, em relação à massa total), com foco na aplicação em elementos pré-moldados não estruturais. O papel Kraft passou por um tratamento físico simples para a obtenção das fibras, que foram então incorporadas às misturas de concreto. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, abatimento (slump test), absorção e análise granulométrica após o período de cura. Os resultados preliminares indicam que a adição das fibras de papel Kraft é tecnicamente viável, mantendo ou até mesmo melhorando o desempenho mecânico do concreto em determinadas proporções. Além de contribuir para a redução do descarte de resíduos e do uso de matérias-primas convencionais, a proposta reforça o potencial do setor da construção civil em adotar práticas ambientalmente responsáveis. Conclui-se, portanto, que a incorporação de resíduos celulósicos ao concreto representa uma alternativa promissora para aliar sustentabilidade, inovação e eficiência na construção civil.

Palavras-chave: Fibra, papel kraft, compósitos, cimento, resíduo, concreto.

ABSTRACT

The construction industry is one of the sectors that most contributes to job creation in Brazil, representing a significant share of the Gross Domestic Product (GDP). In 2024, according to data from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), the sector showed a growth of 4.1%, reinforcing its economic and social relevance. However, this growth is accompanied by significant environmental impacts, especially due to the high energy consumption and the generation of solid waste, such as plastics and papers from packaging materials, especially cement. The improper disposal of these materials has exacerbated urban environmental problems, making the search for more sustainable solutions urgent. Given this reality, this study proposes the reuse of Kraft paper, originating from cement packaging, in concrete production, through the extraction and incorporation of cellulosic fibers. The main objective is to evaluate the performance of concretes modified with different contents of these fibers (0.0%, 1.5%, 2.5%, 5%, and 10%, in relation to the total mass), focusing on the application in non-structural precast elements. The Kraft paper underwent a simple physical treatment to obtain the fibers, which were then incorporated into the concrete mixtures. Compression strength, slump test, absorption, and granulometric analysis tests were carried out after the curing period. Preliminary results indicate that the addition of Kraft paper fibers is technically feasible, maintaining or even improving the mechanical performance of the concrete in certain proportions. In addition to contributing to the reduction of waste disposal and the use of conventional raw materials, the proposal reinforces the potential of the construction sector to adopt environmentally responsible practices. It is concluded, therefore, that the incorporation of cellulosic waste into concrete represents a promising alternative to combine sustainability, innovation, and efficiency in construction.

Keywords: Fiber, kraft paper, composites, cement, waste, concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1	Produção de papéis.....	23
Gráfico 2	Curva Granulométrica do Agregado Miúdo.....	41
Gráfico 3	Curva Granulométrica do Agregado Graúdo.....	42
Gráfico 4	Gráfico dos ensaios de absorção de água.....	43
Gráfico 5	Gráfico dos ensaios de compressão axial	44
Figura 1	Formação da β -glicose	25
Figura 2	Estrutura da celulose	26
Figura 3	Esquema de preparação das amostras para os ensaios de compressão	30
Figura 4	Processo de obtenção da fibra Kraft.....	32
Figura 5	Processamento do material	33
Figura 6	Liquidificador industrial (laboratório do IFPI).....	33
Figura 7	Fibras kraft extraídas	34
Figura 8	Pesagem do material pós secagem	35
Figura 9	Amostras preparadas	36
Figura 10	Pesagem das amostras pós cura	36
Figura 11	Pesagem das amostras	37
Figura 12	Amostras imersas em água	37
Figura 13	Pesagem dos CP's úmidos.....	38
Figura 14	<i>Slump teste</i> e confecção de corpos de prova (CP's).....	39
Figura 15	Ensaio de compressão axial	40
Figura 16	Classes de resistência de concretos estruturais	45

Figura 17 Distribuição das fibras.....	46
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Teores de Fibras Kraft por traço	39
Tabela 2	Abatimento das amostras (<i>slump test</i>)	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAIN	Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
AsBEA	Associação Brasileira dos Escritórios de Arquitetura
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Cimento Portland
CP's	Corpos de prova
CPP	Corpos de prova padrão
CPK	Corpos de prova com adição de fibras kraft
g	grama
g/cm ³	grama por centímetro cúbico
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
Kg	quilograma
MPa	Mega Pascal
mm	milímetro
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul

PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRETEL	Pré-moldados Teresina LTDA
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

LISTA DE SÍMBOLOS

% Porcentagem

α Alfa

β Beta

°C Grau Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	PROBLEMA DA PESQUISA.....	18
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	OBJETIVO	19
1.3.1	Objetivos específicos	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	SUATENTABILIDADE	21
2.2	RESÍDUOS SÓLIDOS	21
2.3	PAPEL KRAFT	23
2.3.1	Reação inicial: Dissolução da lignina.....	24
2.3.2	Reações secundárias (formação de compostos solúveis).....	24
2.3.3	Ação sobre a celulose e hemicelulose (carboidratos).....	24
2.3.4	Equilíbrio químico (licor de cozimento)	25
2.4	FIBRAS NATURAIS	27
2.5	CIMENTO PORTLAND.....	28
2.6	CONCRETO	29
3	METODOLOGIA	30
3.1	REFERÊNCIA DA PRODUÇÃO DE CONCRETO E ENSAIOS DE COMPRESSÃO	30
3.2	PRODUÇÃO DA POUPA E EXTRAÇÃO DAS FIBRAS	31
3.3	DOSAGEM E ENSAIOS DE ABSORÇÃO.....	35
3.4	DOSAGEM E ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	38

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1	CARACTERIZAÇÕES	41
4.1.1	Granulometria.....	41
4.1.2	Ensaio de absorção por imersão	43
4.1.3	Ensaio de resistência a compressão	44
4.1.4	Análise de distribuição de fibras	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS	
	FUTURAS.....	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil está em constante transformação o que gera quantidade significativa de empregos, de acordo com dados do Ministério do Trabalho o setor apresentou um salto de pouco mais de 1,9 milhões no ano de 2020 para 2,4 milhões em 2022 de trabalhadores com carteira assinada (CBIC, 2022), mantendo-se em crescimento mesmo durante o período da pandemia, segundo dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) sendo responsável por cerca de 6,9% do PIB (Produto Interno Bruto) (ABRAINC, 2022).

Em paralelo ao bom desempenho social e urbano que a construção civil proporciona, pode-se destacar também a grande quantidade de resíduos produzidos no Brasil, gerando aproximadamente 84 milhões de metros cúbicos (SINIR, 2022) com destaque para as embalagens dos produtos que em grande parte são descartadas no meio ambiente gerando problemas de saneamento, danos ao solo e ao lençol freático causando a contaminação ambiental (FERREIRA et al., 2019).

Dos insumos usados na construção civil, pode-se destacar o cimento Portland como um dos principais, com destaque para o consumo aparente em 2021 que foi de 64,5 milhões de toneladas e sua produção de 65,8 milhões de tonelada (SNIC 2022), produtos esses que são comercializados em grande parte ensacados e cada saco tem peso médio de 150g (MORAIS et al., 2022).

Contudo o cimento é embalado em sacos de múltiplas folhas feitos de papel não branqueado altamente resistente, o que facilita o manuseio e o protege da umidade para que possa ser comercializado. Esse material conhecido como Kraft é uma estrutura polimérica $(C_6H_{10}O_5)_n$ de origem natural constituído principalmente por celulose, que por ser polissacarídeo é insolúvel em água necessita de um tempo de 3 a 6 meses para se decompor na natureza. Uma vez em contato direto com o agente químico, neste caso o cimento, o papel Kraft se torna um potencial contaminante ambiental que por não haver processos de reciclagem adequados ou uso secundário desse resíduo que é comumente descartado em lixões, aterros sanitários ou diretamente no solo e seu acúmulo acaba gerando graves impactos ambientais (CARVALHO et al. 2023).

Há algum tempo, em meados dos anos 80, faz-se o uso de fibras vegetais como reforço de matriz cimentícia para a construção civil, o que é muito importante e de grande interesse para muitos países no desenvolvimento de compósitos mais sustentáveis (CRISTINA et al., 2018). No entanto, a utilização de fibras celulósicas na síntese de compósitos de concreto ainda é pouco explorada.

Nesse sentido a fibra do papel Kraft tratado corretamente torna-se um objeto

de estudos promissor devido às suas propriedades mecânicas e resistência, o que pode contribuir de forma positiva na utilização em compósitos cimentícios, facilitando a inserção desse material de grande potencial como alternativa sustentável e econômica. Neste estudo, será investigado o potencial uso do papel Kraft na produção de compósitos de concreto analisando com foco em suas propriedades mecânicas.

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

Atualmente a busca pela conscientização e questionamentos sobre a aplicação de técnicas mais sustentáveis colaboram para a busca por alternativas que ajudem a reduzir os problemas ambientais. Vale ressaltar que tais problemas estão intimamente ligados à geração de resíduos pelo setor da construção civil, que conta com um grande desafio de se reinventar para reaproveitar materiais que seriam descartados, como por exemplo, a embalagem de cimento feita de papel Kraft.

Como este é um material feito para armazenar cimento Portland, deve ser tratado de forma diferente, pois segundo CARVALHO et al. (2023) após uso e descarte este é considerado um problema socioambiental, que apesar da decomposição rápida do papel, em torno de 6 meses, o resíduo de cimento não se decompõe facilmente elevando o pH e assim contaminando o meio ambiente causando um desequilíbrio no sistema, tornando-o um potencial contaminante.

Com o objetivo de utilizar este material como componente na composição de pasta cimentícia, busca-se oferecer uma alternativa mais sustentável e menos prejudicial ao meio ambiente. Esse propósito motivou o estudo em questão, que propõe a reutilização de embalagens de papel kraft como matéria-prima no concreto. A intenção é conferir ao concreto novas propriedades mecânicas e físicas, ao mesmo tempo em que se reduz o descarte inadequado e a geração de resíduos sólidos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Uma das razões fundamentais para realizar este estudo é o compromisso com a sustentabilidade na indústria da construção civil, com um foco específico no reaproveitamento de papel Kraft utilizado nas embalagens de cimento. O crescimento das atividades na construção civil resultou em um aumento significativo na geração de resíduos sólidos, provenientes de demolições, reformas e outras fontes, o que levanta preocupações sobre a gestão ambiental responsável desses

resíduos (BRASILEIRO et al., 2015). Segundo Ribeiro (2017), esse enfoque se alinha com princípios importantes estabelecidos por organizações respeitadas, como a Associação Brasileira dos Escritórios de Arquitetura (AsBEA) e o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), que enfatizam a importância de "reduzir, reutilizar, reciclar e dispor adequadamente os resíduos sólidos".

Conforme a Resolução nº 307 de 2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), os aterros sanitários municipais não podem receber resíduos de construção civil, colocando a responsabilidade de lidar com esses resíduos nas mãos das construtoras. No entanto, muitas vezes, esses resíduos são descartados de maneira inadequada, causando poluição ambiental (SANTANA, 2016).

A parte teórica desta pesquisa é demonstrar como a crescente preocupação com a sustentabilidade tem impulsionado a busca por novas abordagens de reaproveitamento de resíduos anteriormente não aproveitáveis, incorporando-os ao concreto convencional, juntamente com os materiais agregados necessários, como a brita, areia e o cimento. Isso não só visa a reduzir o desperdício de resíduos, mas também a melhorar a qualidade, eficiência e desempenho do concreto. Do ponto de vista científico, acreditamos que é fundamental realizar pesquisas e testes de metodologias que contribuam para uma gestão mais eficaz dos fatores ambientais, econômicos e de eficiência na indústria da Construção Civil.

1.3 OBJETIVO

Usar fibras Kraft de embalagens de cimento Portland na incorporação em compósitos de concreto auxiliando na redução de resíduos sólidos da construção civil.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Coletar papel Kraft de embalagens de sacos de cimento;
- Realizar o pré-tratamento: limpeza, molho e trituração do saco de cimento residual;
- Realizar a síntese de corpos de prova fibrosos nas proporções 1:2:3 (areia,

cimento, brita) além dos percentuais de fibra do papel Kraft (0,0%; 1,5%; 2,5%; 5,0% e 10,0%);

- Caracterizar por granulometria, absorção de água, resistência à compressão e distribuição das fibras nos corpos de prova;
- Comparar as propriedades do concreto com e sem adição de fibras Kraft;
- Propor uma alternativa viável e sustentável para a redução da quantidade de resíduos sólidos produzidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Serão apresentados estudos anteriores sobre o uso de fibras em compósitos de concreto. Também serão discutidos os benefícios da utilização de fibras naturais em compósitos de concreto, como a redução de fissuras, aumento da resistência e durabilidade, além de sua contribuição para a sustentabilidade.

2.1 SUSTENTABILIDADE

A sustentabilidade é um tema que está cada vez mais presente na vida de todas as pessoas, ainda que esses indivíduos não percebam os problemas ambientais causados durante décadas da evolução humana e o crescimento populacional. Por essa razão é um assunto de grande abordagem no mundo todo como uma forma de amenizar os problemas ambientais que o próprio ser humano vem causando ao planeta Terra (IAQUINTO, 2018).

Hoje o reconhecimento do desenvolvimento sustentável é mundial e de grande importância para o mundo e principalmente para empresas/indústrias que geralmente possuem departamentos especializados em gestão ambiental de recursos, que atualmente tem importância social, econômica e ambiental. Uma das consequências que surgem desse processo é adoção de uma postura proativa buscando a sustentabilidade atendendo as necessidades atuais sem comprometer as gerações futuras (GUEDES et al., 2022).

Há um desafio em reduzir os impactos ambientais e gerir esses resíduos sólidos nas empresas/indústrias de Construção Civil, que vem sendo exigido pelo poder público a cumprir determinadas normas, requisitos legais e se adequar a modelos mais sustentáveis atualmente, como consequência podemos citar a viabilidade econômica e a melhor qualidade de vida a gerações futuras com a redução desses impactos ao meio ambiente (VIANA, 2009).

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

Entende-se por resíduos sólidos todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido

ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (IBAMA, 2022).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), implantada em agosto de 2010 pela Lei nº 12305, os tipos de resíduos sólidos são classificados quanto a origem em: resíduos domiciliares, de limpeza urbana, de sólidos urbanos, de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviço, de serviços públicos e saneamento básico, industriais, de serviços de saúde, da construção civil, agrossilvopastoris, de serviços de transportes e mineração, e quanto à periculosidade em resíduos perigosos e não perigosos (SINIR, 2022).

Ainda segundo o PNRS (Lei Federal nº 12.305/2010) os resíduos da construção civil são os gerados em construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis (SINIR, 2022), o processo de degradação desses resíduos é difícil e lento, fazendo com que o volume acumulado não diminua com o tempo. O Brasil gera por ano, aproximadamente 84 milhões de metros cúbicos de resíduos de construção civil de acordo com a ABRECON (Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição).

Os resíduos da construção civil são divididos em classes A, B, C e D segundo resolução nº 307 do Artigo 3º do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente).

- Classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - a) De construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - b) De construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
 - c) De processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
- Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;
- Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas

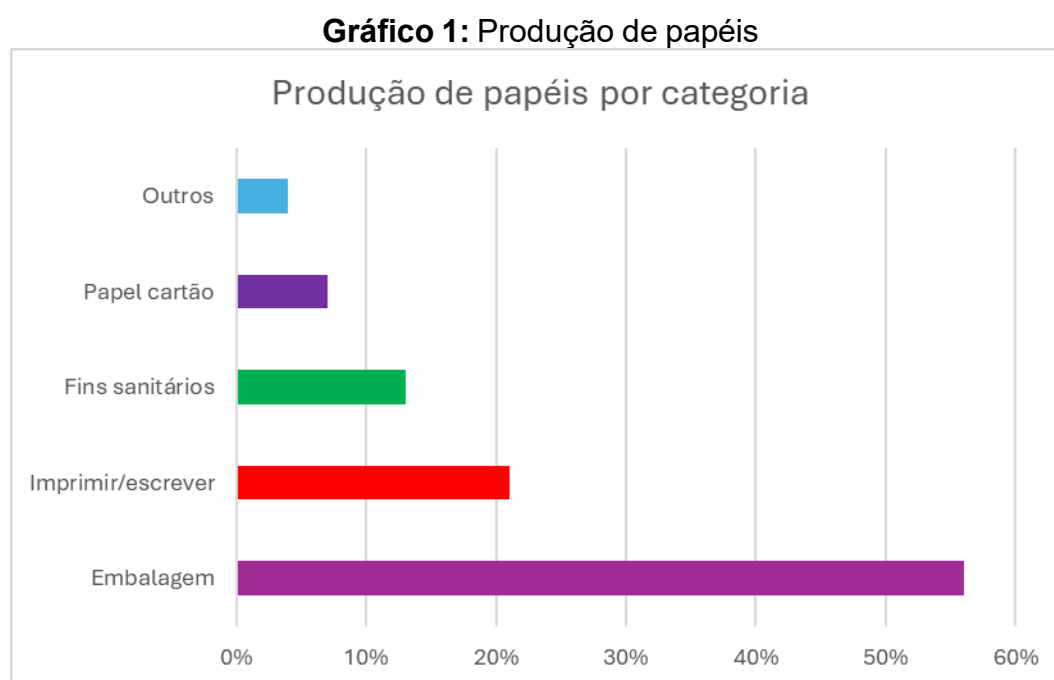
tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

- Classe D – são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Desse modo iremos tratar da classe B no qual se enquadram os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros (IBAMA, 2022).

2.3 PAPEL KRAFT

O papel é um material amplamente utilizado na produção de embalagens, principalmente devido à sua resistência e durabilidade. Segundo o Relatório Estatístico Anual da Associação Nacional dos Aparistas de Papel – ANAP (2022), a indústria brasileira é dividida em 5 categorias (embalagens, imprimir/escrever, fins sanitários, papel cartão e outros), sendo que os papéis para a produção de embalagens representaram cerca de 11 milhões de toneladas produzidas em 2022. No Gráfico 1 é apresentado a percentagem de produção de papel em cada categoria.



Fonte: ANAP (2022) Ibá – Elaboração Anguti Estatística (Adaptado)

O papel Kraft é um tipo bastante usado para diversas finalidades e devido às suas características mecânicas e resistência é usado principalmente em embalagem

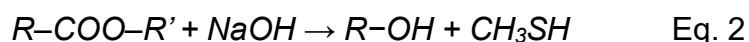
de cimento Portland facilitando a comercialização e o manuseio do produto até a chegada ao consumidor final. O papel Kraft recebe esse nome em virtude do processo no qual ele é produzido que ficou conhecido como processo Kraft ou Sulfato desenvolvido em 1879 e patenteado em 1884 por C. F. Dahl e utilizado comercialmente em 1885 na Suécia tomando impulso a partir de 1930 e predominando até os dias atuais (HARMSEN et al., 2013). O processo consiste em atuar sobre a madeira em forma de cavacos com uma combinação dos reagentes químicos NaOH e Na₂S dissolvendo a lignina e liberando as fibras de celulose (ALÉN, 2015).



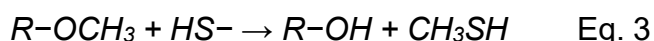
2.3.1 Reação inicial: Dissolução da lignina

A lignina é solubilizada por reações com os compostos alcalinos do licor branco (solução de NaOH e Na₂S). As principais reações envolvem a quebra das ligações éster e éter da lignina, são:

- Hidrólise alcalina:



- Retirada do grupo metil da lignina pelo íon hidrossulfeto (HS⁻):



2.3.2 Reações secundárias (formação de compostos solúveis)

A lignina degradada forma compostos orgânicos solúveis em meio alcalino, como ácidos orgânicos e fenóis. Os principais produtos intermediários incluem:

- Sais de ácido fenólico e compostos sulfurados voláteis (metanotiol e dimetil sulfeto).

2.3.3 Ação sobre a celulose e hemicelulose (carboidratos)

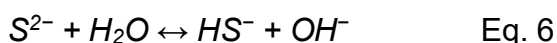
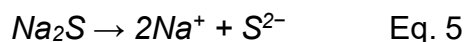
- A celulose é relativamente estável durante o processo kraft e permanece como fibra.
- A hemicelulose, por outro lado, é parcialmente degradada por hidrólise alcalina:



2.3.4 Equilíbrio químico (licor de cozimento)

Durante o cozimento, o equilíbrio entre os reagentes principais também é importante. O Na_2S e NaOH geram íons hidróxido (OH^-) e hidrossulfeto (HS^-) que participam das reações:

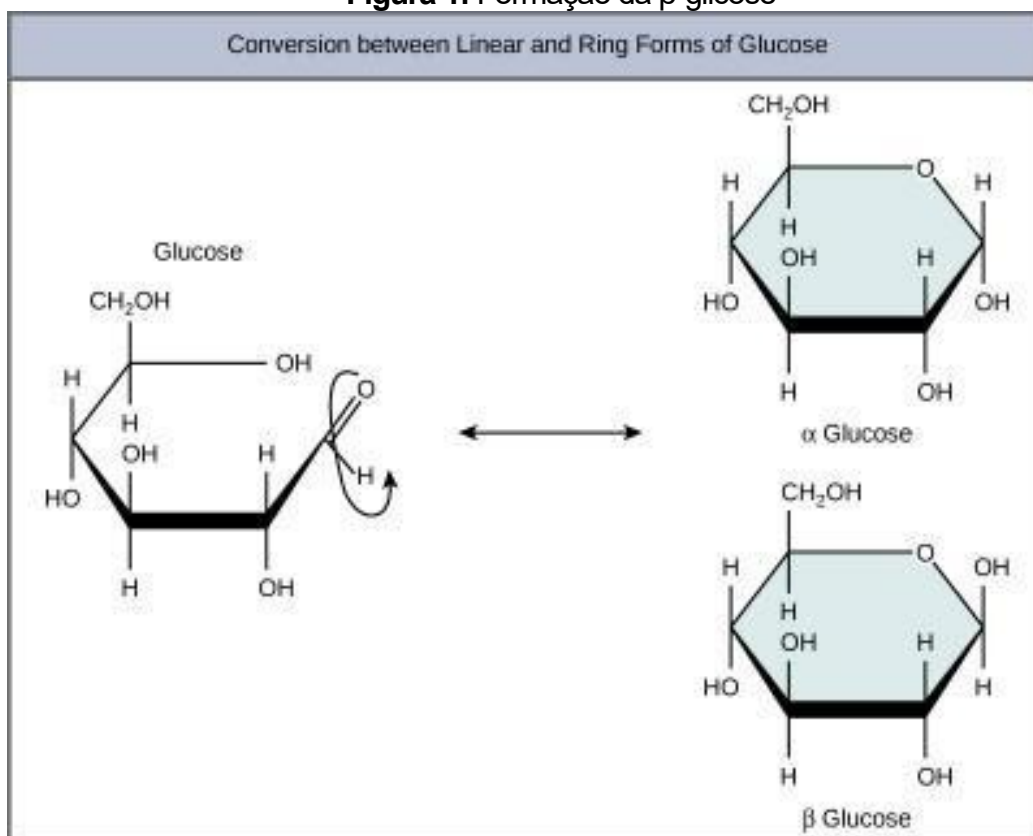
- Dissociação do Na_2S :



Esses íons desempenham um papel muito importante na quebra da lignina, permitindo sua dissolução durante o equilíbrio da reação.

O principal constituinte do papel Kraft é a celulose não branqueada com cerca de 86% da sua composição (outros constituintes são: lignina, hemiceluloses e substâncias minerais, proteicas e ácidos), este composto é polímero mais abundante de todos os compostos orgânicos de ocorrência natural, insolúvel e originário da parede celular dos vegetais que é formado pela união de moléculas de β -glicose fazendo com que esse carboidrato complexo ou polissacarídeo tenha mais resistência em sua estrutura (FOGAÇA, 2022). Principais constituintes do papel Kraft:

Figura 1: Formação da β -glicose

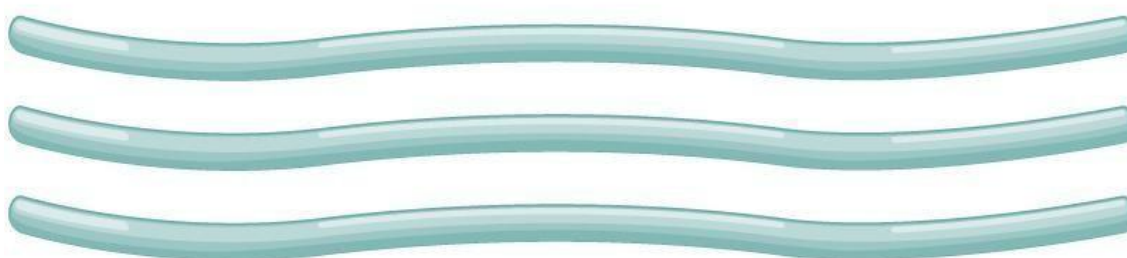


Fonte: RYE, 2016.

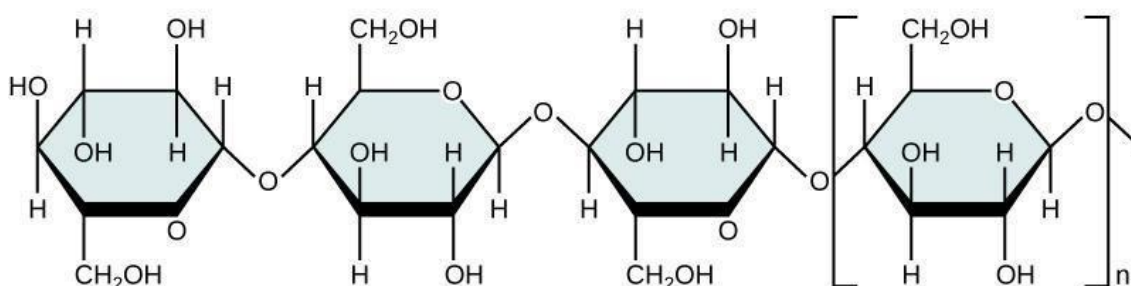
Os monossacarídeos podem existir como uma cadeia linear ou como moléculas em forma de anel que geralmente se forma em soluções aquosas, portanto, a glicose na forma de anel pode ter dois arranjos diferentes do grupo hidroxila (OH) em torno do carbono 1 (anomérico) que se torna assimétrico no processo de formação do anel. Se o grupo hidroxila estiver abaixo do carbono 1 no açúcar, diz-se que está na posição alfa (α), e se estiver acima do plano, diz-se que está na posição beta (β) como mostra a Figura 1.

Figura 2: Estrutura da celulose

Cellulose fibers



Cellulose structure



Fonte: RYE, 2016.

O francês Anselme Payen foi o químico responsável pela descoberta da celulose em 1838, que consiste em mais de 3.000 ou mais unidades de glicose em sua composição e compreende cerca de 33% de toda matéria vegetal (BARBOSA, 2011). Como mostrado na Figura 2, todos os outros monômeros de glicose na celulose são compactados firmemente como longas cadeias estendidas, isso confere à celulose sua rigidez e alta resistência à tração que é tão importante para as células vegetais.

2.4 FIBRAS NATURAIS

Na construção civil, várias fibras são usadas para reforçar o concreto e melhorar suas propriedades, dentre elas destacam-se as fibras de aço, vidro, polipropileno, polietileno, carbono, sintéticas e vegetais.

Segundo Barros et al. (2023) a utilização de fibras como reforço começou nos tempos antigos com a fibra de linho, e a partir da década de 60 as fibras sintéticas foram surgindo, apresentando inúmeras vantagens, como baixo custo, baixa massa específica, maciez e abrasividade curta; recicláveis, não tóxicas e biodegradáveis.

Ainda segundo Barros et al. (2023) os materiais de construção usados causam muitos impactos negativos ao meio ambiente e por esse motivo o uso de fibras naturais como reforço no concreto apresenta uma série de vantagens por ser biodegradável, apresentar comportamento mecânico eficiente, ser de fácil acesso e baixo custo.

Alves (2016) estudou a influência da adição de fibras de celulose nas características de blocos de concreto não estrutural, analisando a viabilidade da produção de concreto usando fibras provenientes do processo de reciclagem de embalagens de cimento, com o intuito de dar um destino ambientalmente adequado a esse resíduo e concluiu que o material atendeu aos requisitos normativos com teor de fibra em 0,5% para ensaios de resistência e absorção de água.

Morais et al. (2022) avaliou a adição de fibras provenientes do reaproveitamento de embalagens de papel Kraft de cimento Portland, na argamassa de cimento e areia e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas do compósito, observando que é possível considerar o traço 0,5% de fibras celulósicas como satisfatório para a destinação adequada do resíduo.

Ainda podemos citar Andrade (2017) que desenvolveu um estudo sobre a viabilidade do uso do papel Kraft como fibra em peças de concreto para pavimentação, avaliando a resistência do concreto com base nas dosagens em relação à massa de cimento e comparando as peças produzidas com peças convencionais de acordo com os parâmetros de qualidade exigidos pela norma 9781 (2013), obtendo resultados satisfatórios com melhor desempenho mecânico em peças com baixa porcentagem de fibras (1,25% e 2,5%) em relação ao concreto padrão.

Deste modo, a incorporação de fibras naturais oriundas de reciclagem usadas em concreto na construção civil, são uma alternativa que contribui para o desenvolvimento sustentável e redução do impacto ambiental causado pelo setor.

2.5 CIMENTO PORTLAND

O cimento é um material inorgânico amplamente utilizado na construção civil e é o tipo mais comum encontrado no mercado. De acordo com Castro (2021), a origem do cimento se deu no Egito antigo, mas sua forma moderna chamada de cimento Portland foi patenteada em 1824 pelo inglês Joseph Aspdin. Segundo ele o construtor escolheu esse nome porque o material apresentava uma cor e consistência que o fizeram remeter às rochas da ilha britânica Portland.

Ainda segundo Castro (2021), o cimento é formado a partir de uma reação térmica da mistura de dois componentes para a extração dos óxidos necessários para sua hidratação que são: calcário (carbonato de cálcio) e argila (silicatos de alumínio). O carbonato de cálcio aquecido em altas temperaturas formando a cal e liberando CO_2 e da argila são extraídos os óxidos SiO_2 , Al_2O_2 e o Fe_2O_3 .

Contudo, Castro (2021) afirma em seu trabalho que a composição do cimento influencia diretamente suas propriedades tanto em estado fresco quanto endurecido. Mostrando a seguir os tipos mais comuns de cimento no mercado com diferentes composições e características:

- a) Cimento Portland comum - Pode ser designado como CP I ou CP I-S (sem ou com adição, respectivamente). A norma brasileira exige que a sigla seja acompanhada do número 25, 32 ou 40, que representam a resistência à compressão aos 28 dias de idade, em MPa (NBR 5732, 1991).
- b) Cimento Portland tipo II - É um cimento composto e mais resistente ao ataque de sulfatos. O tipo do CP II é determinado pela adição (CP II-E, com escória; CP II-Z, com pozolana; e CP II-F, com filer). E, além de ser indicado para praticamente todas as fases de uma obra, o seu custo e disponibilidade o torna muito popular.
- c) Cimento Portland de alto forno - Conhecido como CP III, contém a adição de 35 a 70% de escória, e por isso apresenta maior durabilidade.
- d) Cimento Portland pozolânico - O CP IV apresenta de 15 a 50% de material pozolânico em sua composição. Apresenta baixo calor de hidratação, baixa porosidade e gera um produto mais resistente a longo prazo quando comparado com cimentos comuns.
- e) Cimento Portland de alta resistência inicial - É o cimento CP V - ARI. Assim como o CP I, não apresenta adições, porém apresenta uma dosagem diferente na produção do clínquer. A vantagem deste produto é a velocidade

em que a resistência máxima à compressão é alcançada. O cimento ARI apresenta alta resistência após apenas 7 dias da hidratação.

2.6 CONCRETO

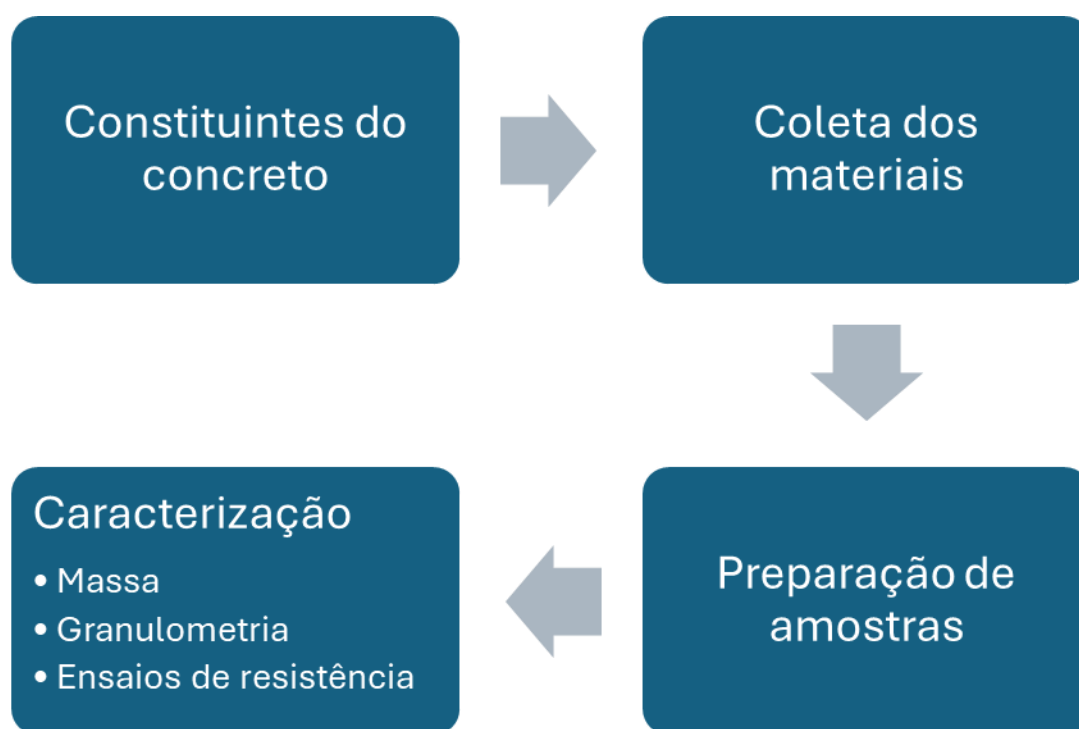
O concreto é um material de construção amplamente utilizado em todo mundo devido à sua versatilidade, durabilidade e resistência. Ele é composto principalmente por cimento, agregados (como areia e cascalho) e água.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, delineamos a abordagem técnica para a produção do concreto padrão e incorporado com fibras celulósicas de papel Kraft, incluindo a obtenção de materiais, caracterização e execução de ensaios de desempenho. Detalhamos os métodos utilizados, as propriedades dos materiais e os testes realizados para uma compreensão abrangente do processo, essas análises foram realizadas inicialmente na indústria de pré-moldados e sua maior parte no IFPI.

3.1 REFERÊNCIA DA PRODUÇÃO DE CONCRETO E ENSAIOS DE COMPRESSÃO.

Figura 3: Esquema de preparação das amostras para os ensaios de compressão



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Na primeira etapa deste estudo foi observado a produção usual diária de concreto na indústria de pré-moldados PRETEL, tomando como base os valores de proporção 1:2:3 respectivamente cimento, areia, brita e fator água/cimento de 0,4. A dosagem padrão da fábrica foi estudada experimentalmente em laboratório,

adicionando o teor de fibras (1,5%, 2,5%, 5% e 10%) do processamento das embalagens de cimento Portland. Para os ajustes e verificação dos pré-moldados, foram utilizadas como referência as normas técnicas:

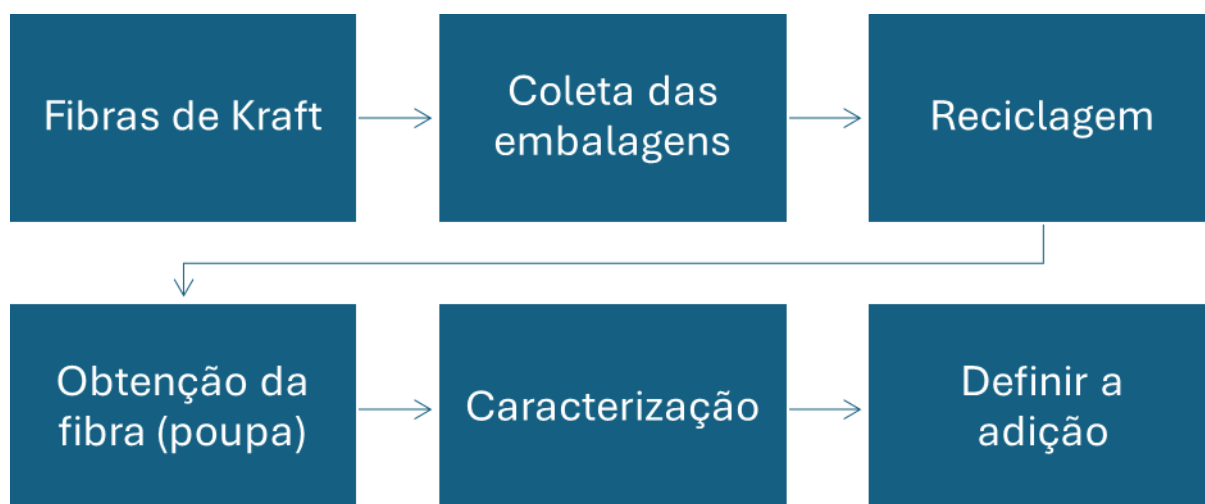
- ABNT NBR 11578:1991 – Cimento Portland Composto – Especificações;
- ABNT NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica;
- ABNT NBR 12566:2015 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento.

Foram analisadas também as amostras sem adição de fibra Kraft por meio do uso dos valores padrão de resistência à compressão axial do concreto para estruturas, tomando como base os resultados realizados no laboratório que presta serviço para a indústria que são de 25,80 Mpa para 1 dia, 41,02 Mpa para 14 dias e 47,86 Mpa para 28 dias.

Para a preparação dos Corpos de Prova (CP's), foram realizadas análises de granulometria dos agregados grão e miúdo, obtendo para a areia um módulo de finura 1,89 e diâmetro máximo de 1,20 mm sendo considerado areia muito fina e para a brita um módulo de finura de 6,96 com diâmetro máximo de 12,50 mm classificada como brita 1. O cimento que foi usado é da marca Poty CII-F40, indicando que possui alta resistência inicial e final com baixa demanda de água e o abastecimento das betoneiras com água para a produção do concreto é proveniente de um poço localizado na própria indústria, todo material é usado na dosagem de 1:2:3:0,4 (cimento, areia, brita e fator água/cimento 0,4).

3.2 PRODUÇÃO DA POUPA E EXTRAÇÃO DAS FIBRAS

Na figura 5 mostra a produção da poupa e extração das fibras para que possam ser incorporados posteriormente à pasta cimentícia e comparada suas propriedades mecânicas e de absorção.

Figura 4: Processo de obtenção da fibra Kraft

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

A preparação iniciou-se com a coleta das embalagens de cimento Portland, que foram limpas com água reutilizada e colocadas imerso em água para a hidratação num recipiente a uma temperatura inicial de 32.1 °C por 24 horas. Após esse período foi aferida a temperatura do recipiente novamente que marcava 22.4 °C, posteriormente a esse processo realizou-se o corte do papel manualmente para facilitar a separação das fibras que posteriormente foram processadas num triturador improvisado feito com uma furadeira, vergalhão em T, uma hélice de roçadeira em nylon e um balde de tinta com tampa furada no centro por aproximadamente 3 minutos com a mesma água do molho. Como visualmente o material ainda não estava adequado para uso como mostrado na Figura 5, foi processado e submetido a mais uma redução em um liquidificador industrial do laboratório do IFPI como mostram as Figuras 6a e 6b, extraíndo as fibras kraft no tamanho julgado ideal como mostram as Figuras 7a e 7b para posteriormente ser incorporado à pasta de concreto. Com as embalagens trituradas e juntas, formou-se uma espécie de polpa bem fibrosa, chamada polpa Kraft, que foi reservada em seguida, caracterizando assim o fim do processamento do material objetivo do estudo.

Figura 5: Processamento inicial do material



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 6: Liquidificador industrial (laboratório do IFPI)



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 7: Fibras kraft extraídas.

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Após o processamento do material e obtenção da poupa, foi retirado o excesso de água por torção, usando um pano e em seguida foi feito a pesagem do material úmido com auxílio de uma balança convencional ramuza DCRB CL de propriedade da indústria com variação de 5g como mostra a Figura 8. A umidade aproximada da poupa foi aferida utilizando um forno elétrico por indução, obtendo-se 40% de umidade da amostra pesada calculada como mostra a fórmula abaixo.

$$Massa(\%) = \frac{100\% \cdot m_{final}}{m_{inicial}}$$

A massa em porcentagem é encontrada de forma simplificada pela multiplicação da massa final (m_{final}) pelo fator de porcentagem dividido pela massa inicial ($m_{inicial}$) do compósito.

Figura 8: Pesagem do material pós secagem

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

3.3 DOSAGEM E ENSAIOS DE ABSORÇÃO

A polpa kraft produzida, seca e pesada foi novamente processada para a diminuição dos torrões e melhor incorporação no concreto. Foram preparadas amostras com adição de fibra como reforço estrutural nos teores de 1,5%, 2,5%, 5% e 10% em relação à massa total da composição padrão do concreto utilizado na indústria com proporção de 1:2:3 (cimento CII-F40, areia, brita) e relação água/cimento de 0,4.

Com os materiais constituintes do concreto reunidos e a poupa de Kraft, foram preparadas as amostras do compósito para a realização dos ensaios mecânicos e de absorção em fôrmas cilíndricas com dimensões de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro segundo a ABNT NBR 5738/2015. A moldagem dos corpos de prova (CP's) se deu pela junção dos materiais nas proporções definidas, seguido da determinação da consistência de abatimento (*slump test*) obedecendo a NBR NM 67/1998 e enchimento das formas. Antes dos ensaios as amostras foram pesadas para a verificação do seu peso fresco antes da cura como mostrado na Figura 9, para um comparativo da relação peso úmido e peso seco. Foi observado que as amostras mantiveram um peso entre 3.400 gramas e 3.600 gramas enquanto úmidas.

Figura 9: Amostras preparadas

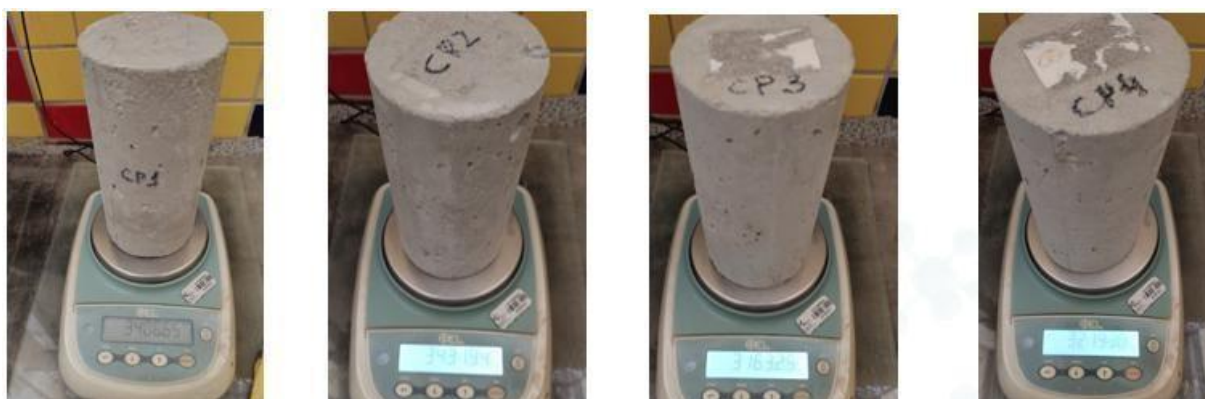
Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Terminado o processo de cura por 24 horas, as amostras foram retiradas das formas e submetidas a nova pesagem, observando uma redução do peso com e sem adição de fibra conforme mostra a Figura 8.

Figura 10: Pesagem das amostras pós cura

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Para a determinação da absorção segundo a NBR 9778 as amostras foram colocadas em uma estufa no laboratório de cerâmica do IFPI por 24 horas por $100^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ para a retirada da umidade. Após o período determinado, as amostras foram retiradas da estufa pesadas novamente como mostra a Figura 11 obtendo-se a massa seca do material, após esse processo foram imersas em água por um período de 72 horas como mostra a Figura 12.

Figura 11: Pesagem das amostras

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Figura 12: Amostras imersas em água

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

As amostras foram enxutas levemente com pano para a retirada do excesso de água e pesadas novamente para determinar sua absorção (Figura 13). Os dados foram coletados para posterior avaliação dos resultados.

Figura 13: Pesagem dos CP's úmidos

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Esses ensaios iniciais são essenciais para determinar parâmetros da amostra sem adição de fibras Kraft, verificando o comportamento do material durante o processo de beneficiamento.

3.4 DOSAGEM E ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Nesta etapa foram preparados os corpos de prova cilíndricos seguindo as orientações das normas específicas ABNT NBR 5738:2015 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova e ABNT 5739:2018 – Concreto – Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos. Para os ensaios de resistência a compressão utilizou-se uma prensa hidráulica marca Shimadzu em laboratório seguindo a norma específica ABNT NBR 7215:2019 para determinação dos ensaios de resistência à compressão no traço utilizado. Os teores de adição de fibras Kraft escolhidos foram de 1,5% e 2,5% devido à baixa absorção da água visando encontrar um valor ótimo de dosagem com características e propriedades semelhantes às do concreto convencional. Para o processo foram confeccionados 24 corpos de prova (CP's) nos teores citados, sendo 6 CP's padrão (0% de fibra Kraft), 6 CP's com 1,5% de fibras Kraft e 6 CP's com 2,5% de fibras Kraft como apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Teores de Fibras Kraft por traço

Corpos de prova	Cimento (kg)	Areia(kg)	Brita(kg)	Água(kg)	Fibra Kraft(kg)
CPP	1	2	3	2,5	0%
CPK	1	2	3	2,5	1,5%
CPK	1	2	3	2,5	2,5%
CPK	1	2	3	2,5	5%
CPK	1	2	3	2,5	10%

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

O ensaio de abatimento foi realizado seguindo a norma específica NBR NM 67:1998, para a determinação da consistência de abatimento tronco de cone (*slump test*) do concreto usado para cada teor citado. Onde foram realizados 24 golpes com soquete para o adensamento às 4 camadas preenchidas de igual volume como ilustrado na Figura 14.

Figura 14: *Slump* teste e confecção de corpos de prova (CP's)

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Tabela 2: Abatimento das amostras (*slump test*)

Amostras	Abatimento (mm)
CPP	48
CPK 1,5	46
CPK 2,5	48
CPK 5	50
CPK 10	47

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Os CP's foram moldados e separados por percentual de traço e por idades para os ensaios de resistência à compressão. Após o processo de cura inicial, foram retirados 2 CP's de cada (0%, 1,5% e 2,5%) para ensaios de 24 horas pós desmolde e os outros 12 CP's foram reservados para cura imersos em água para serem rompidos em 14 e 28 dias respectivamente conforme a ABNT 5739:2018. Todos os corpos foram pesados antes e após o período de cura, para registrar a massa.

Ao realizar todos os ensaios dos compósitos com seus respectivos traços e diferentes teores de fibras Kraft incorporadas, foram analisados os dados estatísticos a fim de comparar quantitativa e qualitativamente os resultados do processo. Na Figura 15 observa-se alguns ensaios de compressão axial feitos no laboratório do IFPI.

Figura 15: Ensaios de compressão axial

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos serão apresentados e discutidos. Foi analisado se a adição de papel Kraft melhorou ou piorou as propriedades mecânicas do compósito de concreto. Também serão discutidas possíveis aplicações do material produzido, como em construções sustentáveis, por exemplo.

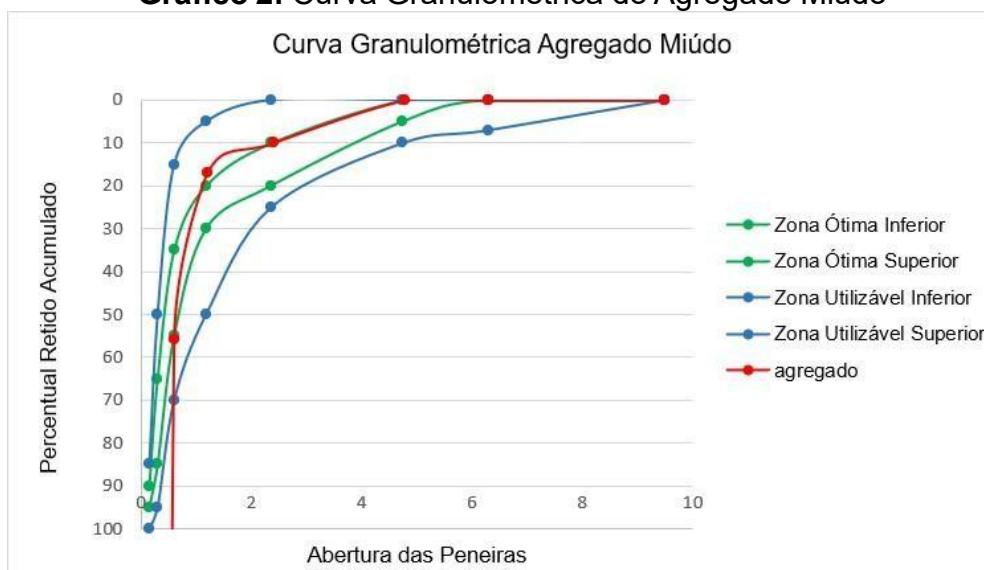
4.1 CARACTERIZAÇÕES

Foram realizados testes para avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos de concreto produzidos com a adição de fibras Kraft (papel Kraft). Foram avaliados parâmetros como granulometria, absorção de água e resistência à compressão. Foi utilizado a análise de imagens para avaliar a distribuição das fibras no concreto.

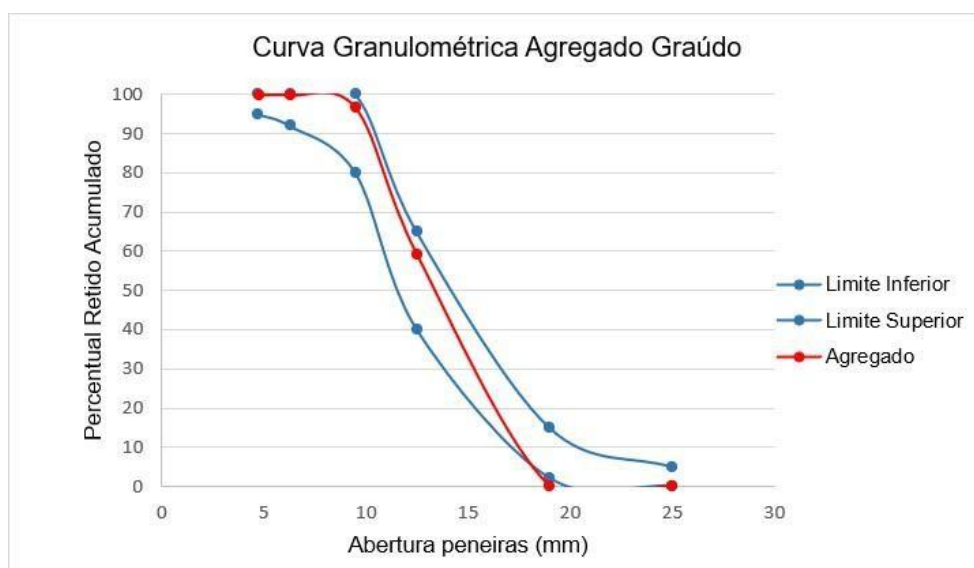
4.1.1 Granulometria

As curvas de granulometria que são apresentadas no Gráfico 2 observa-se que o material está dentro dos limites técnicos estabelecidos pela NBR 7211, que determina a granulometria ideal e qualidade do agregado para a produção de concreto que pode ser determinante para a durabilidade do concreto.

Gráfico 2: Curva Granulométrica do Agregado Miúdo



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Gráfico 3: Curva Granulométrica do Agregado Graúdo

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

A massa unitária do agregado miúdo obtida por meio dos ensaios foi de 1,498 g/cm³ e do agregado graúdo de 1,432 g/cm³ o que pode ser verificado através dos resultados que atendem aos critérios estabelecidos pela NBR NM 45:2006, que diz que os resultados não podem variar mais que 1% em relação à média.

Com base na norma NBR NM 52/2003, que estabelece que os resultados não devem apresentar diferença superior a 0,02 g/cm³ entre si para serem considerados satisfatórios, e considerando os resultados obtidos:

- Agregado miúdo = 2,660 g/cm³
- Agregado graúdo = 2,708 g/cm³

Isso mostra que de acordo com a norma NBR NM 52/2003, os resultados são considerados satisfatórios. No caso do agregado miúdo, a diferença é igual a 0, o que está de acordo com a norma. No entanto, no caso do agregado graúdo, a diferença é de 0,048 g/cm³, o que está acima do limite permitido. Portanto, os valores para a massa específica do agregado miúdo são considerados satisfatórios de acordo com a norma, mas os valores para o agregado graúdo não atendem estritamente às exigências da norma, pois a diferença entre os resultados ultrapassou o limite de 0,02 g/cm³.

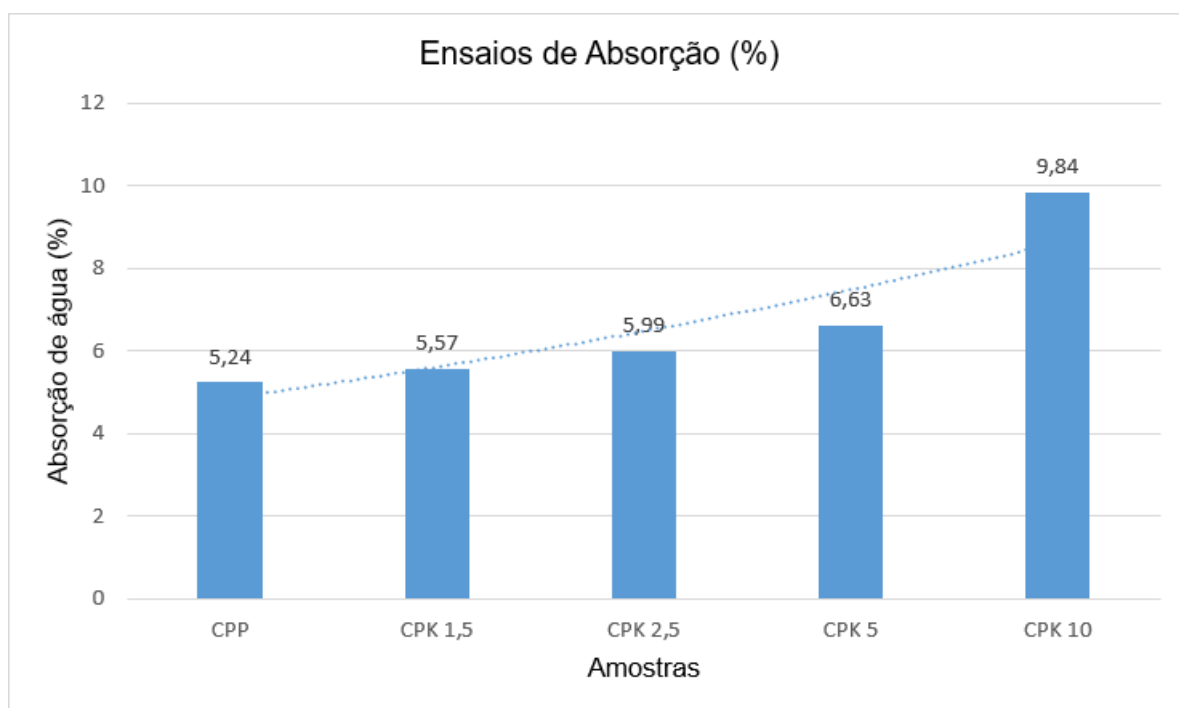
4.1.2 Ensaios de absorção por imersão

Tais ensaios foram realizados em conformidade com norma NBR 9778, tendo como valores de $\leq 4,2\%$ para concreto de alto desempenho, entre $4,2\% \leq a \leq 6,2\%$ para concreto convencional e $\geq 6,2\%$ para concreto deficiente, verificando dessa forma a influência da umidade que colabora diretamente com a resistência do material. De acordo com Dourado (2019) a umidade é fator determinante para a resistência e fragilidade do concreto que pode sofrer com o processo de deterioração da estrutura de concreto que são consideradas as principais patologias da construção de origem da umidade. Os valores referentes à umidade obtida estão representados no Gráfico 4, que para obtê-los foram calculados para cada corpo de prova (CP), de acordo com a Equação 7 em conformidade com a norma:

$$CP = \left(\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \right) \cdot 100 \quad \text{Eq. 7}$$

No qual, a massa saturada (M_{sat}) é subtraída da massa seca (M_s), dividida pela massa seca (M_s) e multiplicada por 100.

Gráfico 4: Ensaios de absorção de água



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

CPP – Corpos de Prova Padrão

CPK 1,5 – Corpos de Prova com 1,5% de fibra Kraft adicionado

CPK 2,5 – Corpos de Prova com 2,5% de fibra Kraft adicionado

CPK 5 – Corpos de Prova com 5% de fibra Kraft adicionado

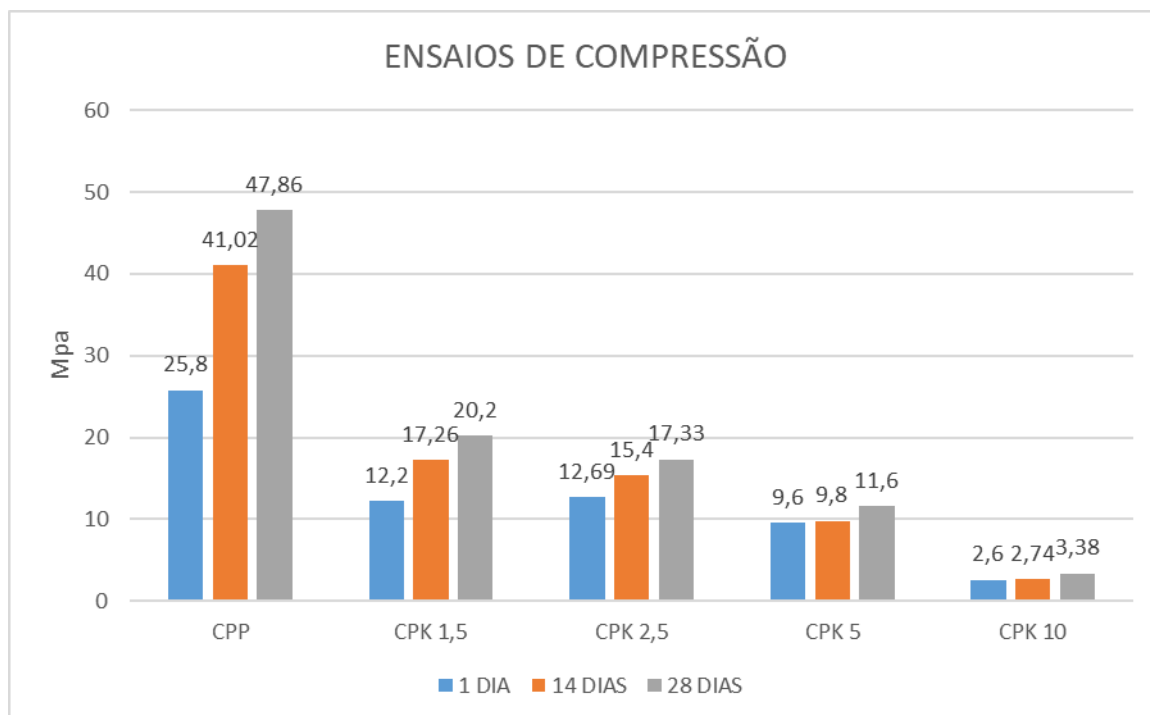
CPK 10 – Corpos de Prova com 10% de fibra Kraft adicionado

Conforme a Tabela os valores obtidos no ensaio estão em conformidade com a norma ABNT NBR 9778 para o CPK 1,5% e CPK 2,5% mantendo-se no limite de absorção, entretanto para o CPK 5,0% foi obtido uma absorção um pouco elevada, mas ainda tolerável para determinadas aplicações, já o CPK 10 apresentou absorção muito elevada acima do limite recomendado.

4.1.3 Ensaio de resistência a compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial estão apresentados no Gráfico 5, com o objetivo de facilitar a sua análise e compreensão detalhada.

Gráfico 5: Ensaio de compressão axial



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Os valores apresentados são médios obtidos a partir das resistências de pares de corpos de prova (prova e contraprova) nos teores determinados anteriormente de 0%, 1,5%, 2,5% e 5%, descartando assim o CPK 10, devido ao seu baixo desempenho nos testes de compressão axial, que apresentou média de resistência muito abaixo dos demais corpos de prova.

Os CPK 1,5 e CPK 2,5 mostraram desempenho semelhantes aos 28 dias de idade próximo ao valor de resistência mínima recomendada pela ABNT que é de 20 MPa, como mostra a Figura 16 onde pode ser observado uma maior proximidade aos valores padrão (CPP) referentes a 1 dia. Já o CPK 5 demonstrou ainda assim uma resistência que pode ser aplicada, apesar de inferior às demais aos 28 dias.

Figura 16: Classes de resistência de concretos estruturais

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão MPa	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão MPa
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

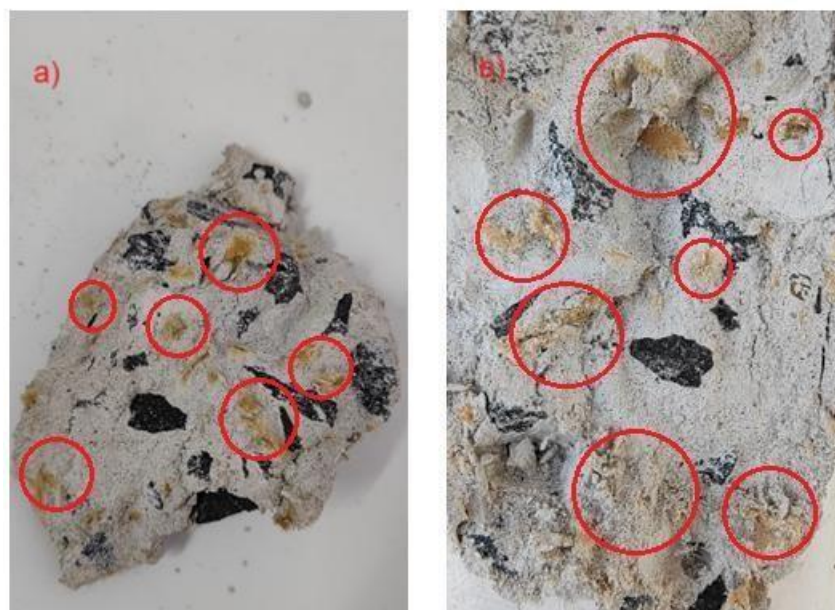
Fonte: ABNT NBR 8953:2015

A baixa resistência à compressão dos CP's pode ter ocorrido devido à alta umidade, já que eles são mantidos submersos em água até o dia do rompimento, com exceção dos CP's com 1 dia de idade, que após a desforma são submetidos aos ensaios de compressão axial. Esse fato se deve ao alto índice de fibras celulósicas que absorvem umidade e não a perdem com facilidade, fazendo com que os CP's se mantenham úmidos mais tempo e consequentemente mais frágeis dificultando a atividade pozolânica, que é essencial para que os materiais reajam com hidróxido de cálcio na presença de água para formar compostos com propriedades cimentícias.

4.1.4 Análise de distribuição das fibras.

A análise de imagens foi realizada para verificar a distribuição das fibras Kraft no compósito como mostra a Figura 17. No processo as fibras formaram vários “ninhos”, aglomerando-se e distribuindo-se de forma irregular ao longo do corpo de prova.

Figura 17: Distribuição das fibras



Fonte: Dados da pesquisa (2024)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

A partir da pesquisa desenvolvida sobre a incorporação de fibras de papel Kraft em compósitos de concreto, é possível concluir que os objetivos propostos foram alcançados. Inicialmente, realizou-se a coleta e o tratamento adequado das embalagens de papel Kraft, garantindo a obtenção de fibras celulósicas aptas à incorporação no concreto. Este processo permitiu a análise detalhada das propriedades mecânicas e físicas dos corpos de prova produzidos.

Os testes realizados, incluindo a caracterização granulométrica, os ensaios de absorção de água e a resistência à compressão, permitiram a comparação entre concretos com e sem adição de fibras Kraft. Observou-se que teores baixos de fibras, especificamente 1,5% e 2,5%, apresentaram um desempenho mecânico aceitável, atingindo valores compatíveis com aplicações não estruturais. No entanto, a adição de 5% e 10% de fibras Kraft comprometeu significativamente a resistência do material, evidenciando a necessidade de um controle rigoroso na dosagem da fibra. O estudo também demonstrou a viabilidade da reutilização de papel Kraft como um aditivo sustentável no concreto, contribuindo para a redução de resíduos sólidos gerados pela indústria da construção civil. A distribuição das fibras nos corpos de prova mostrou-se irregular, formando aglomerados que podem ter influenciado as propriedades mecânicas do concreto.

Diante dos resultados obtidos, pode-se afirmar que a adição controlada de fibras Kraft no concreto é uma alternativa promissora para aplicações sustentáveis, especialmente em elementos pré-moldados não estruturais. Contudo, estudos futuros devem ser conduzidos para otimizar a distribuição das fibras e minimizar os impactos negativos sobre a resistência mecânica do material. Assim, o trabalho contribui para o desenvolvimento de soluções ambientalmente responsáveis na indústria da construção civil, alinhando-se às diretrizes de sustentabilidade e reaproveitamento de resíduos.

Com base nos resultados apresentados, uma perspectiva futura promissora para o uso do papel Kraft na construção civil é sua aplicação em placas de fibrocimento. Essas placas, amplamente utilizadas em coberturas e revestimentos, podem se beneficiar das fibras celulósicas do papel Kraft como reforço, substituindo parcialmente as fibras sintéticas e contribuindo para a redução do impacto ambiental

da indústria. O desenvolvimento de novos compósitos de fibrocimento com fibras Kraft pode resultar em produtos mais sustentáveis, leves e com boas propriedades mecânicas.

Estudos futuros devem explorar a otimização da incorporação das fibras Kraft na matriz cimentícia, avaliando a resistência à flexão, a durabilidade e a interação das fibras com o cimento. Além disso, é essencial investigar tratamentos químicos ou físicos que possam melhorar a adesão das fibras e minimizar sua degradação ao longo do tempo. Dessa forma, a utilização do papel Kraft em placas de fibrocimento pode representar uma solução inovadora para a construção civil, promovendo a sustentabilidade e a economia circular no setor.

REFERÊNCIAS

ALÉN, R. Pulp Mills and Wood-Based Biorefineries. **Industrial Biorefineries & White Biotechnology**, 91–126. doi:10.1016/b978-0-444-63453-5.00003-3, 2015.

ALVES, L. S. **Influência da adição de fibras de celulose (papel kraft) nas características dos blocos de concreto não estrutural**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-03A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 129p, 2016.

ALVES, L. de S., Pereira, F. T. M., & Pereira, C. H. de A. F. (2021). Estudo da interferência de adição de fibras kraft em argamassas / study of the interference of kraft fiber addition in mortars. **Brazilian Journal of Development**, 7(3), 26259–26272, 2021.

ANDRADE, Danilo Teixeira Mascarenhas de. **Uso do papel kraft como fibra em peças de concreto para pavimentação**. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Piauí, Teresina, 2017.

BARBOSA, Anderson de Paula. **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de buriti**. Tese (Doutorado: Área Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. UENF, Campos dos Goytacazes – RJ, 2011.

BARROS, Jéssica Guimarães et al. Viabilidade do uso de fibras vegetais para construções sustentáveis: uma revisão. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 11, p. 19754-19771, 2023.

BRASILEIRO, L. L., & Matos, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, 61(358), 178–189, 2015.

BISPO DOS SANTOS, I., Tadeu Lobato Ferreira, R., Bernardes de Mello Rezende, G., Borges de Moura Aquino, V., Luis Christoforo, A., & Antonio Rocco Lahr, F. Adobe Soil-Lime Bricks Reinforced with Kraft Paper Fibers. **International Journal of Materials Engineering**, 8(5), 128–133, 2018.

BOOYA, E., Ghaednia, H., Das, S., & Pande, H. Durability of cementitious materials reinforced with various kraft pulp fibers. **Construction and Building Materials**, 191, 1191-1200, 2018.

BOOYA, E., Gorospe, K., Ghaednia, H., & Das, S. (2019). Free and restrained plastic shrinkage of cementitious materials made of engineered kraft pulp fibres. **Construction and Building Materials**, 212, 236-246, 2019.

BLANKENHORN, P. R., Blankenhorn, B. D., Silsbee, M. R., & DiCola, M. Effects of fiber surface treatments on mechanical properties of wood fiber- cement composites. **Cement and Concrete Research**, 31(7), 1049-1055, 2001.

CALADO, C., Camões, A., Elias, F., Dalpane, G., Ferraz, B., & Dalpane, T. **Estudo para uso do resíduo do bioetanol celulósico adicionado ao cimento em argamassas de concreto**. CLB-MCS 2018. 3º Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis, 2018.

CARVALHO, E. R. de., Rapôso, Á. L. Q. R. e S., Souza, R. F. M. de ., Silva, L. B. da ., & Marques, S. K. J. Incorporação de fibras de papel kraft provenientes de embalagens de cimento pós-uso para produção de pisogramas de concreto. **Matéria (Rio de Janeiro)**, 28(4), e20230142. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0142>, 2023.

CASTRO, V. G. **Cimento Portland**. In: Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro [online]. Mossoró: EdUFERSA, pp. 13- 21. ISBN: 978-65-87108-26-1, 2021.

CRISTINA, P., Salomão, P. E. A., Cangussú, L., & Carvalho, P. H. V. de. Tijolo solo cimento com adição de fibra vegetal: uma alternativa na construção civil. **Research, Society and Development**, 7(9), e779439. <https://doi.org/10.17648/rsd-v7i9.439>, 2018.

FERREIRA, Robson Soares. Et al. Impactos socioambientais causados pelo descarte incorreto de resíduos sólidos urbanos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 04, Ed. 09, Vol. 03, pp. 51-72, 2019.

GUEDES, Érica Pereira Affonso et al. Gestão de projetos e a sustentabilidade ambiental: Project management and environmental sustainability. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 11, p. 74873-74886, 2022.

HAIGH, R., Sandanayake, M., Bouras, Y., & Vrcelj, Z. A review of the mechanical and durability performance of kraft-fibre reinforced mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, 297, 123759, 2021.

HAIGH, R., Bouras, Y., Sandanayake, M., & Vrcelj, Z. The mechanical performance of recycled cardboard kraft fibres within cement and concrete composites. **Construction and Building Materials**, 317, 2022.

HARMSSEN, P. F. H; LIPS, S.J.J.; BAKKER, R. R. C. Pretreatment of lignocellulose for biotechnological production of lactic acid. **Reserach review. Wageningen UR Food & Biobased Research**. ISBN-number 978-94-6173-607-9, 2013. IAQUINTO, Beatriz Oliveira. A sustentabilidade e suas dimensões. **Revista da ESMESC**, v. 25, n. 31, p. 157-178, 2018.

KHORAMI, M., & Ganjian, E. Improvement of flexural performance of fibre cements composite board through fibre impregnation. Paper presented at the Sustainable. **Construction Materials and Technologies**, August, 2016.

KHORAMI, M., & Ganjian, E. The effect of limestone powder, silica fume and fibre content on flexural behaviour of cement composite reinforced by waste Kraft pulp. **Construction and Building Materials**, 46, 142–149, 2013.

MÁRMOL, G., Santos, S. F., Savastano, H., Borrachero, M. v., Monzó, J., & Payá, J. Mechanical and physical performance of low alkalinity cementitious composites reinforced with recycled cellulosic fibres pulp from cement kraft bags. **Industrial Crops and Products**, 49, 422–427, 2013.

METELSKI, Leticia. **Análise da ação enzimática na produção de papel visando a economia de energia**. 2018. 55 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

MUNIZ, E. R., & de Oliveira, L. A. Propriedades mecânicas de tijolos ecológicos formulados com resíduos de construção civil. **Brazilian Journal of Development**, 60016–60030. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n8-333>, 2022.

RIBEIRO, Fernanda Barbosa. **Adição de papel kraft no concreto: estudo das propriedades mecânicas**. 2017. X f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas/TO, 2017.

RYE, C., Wise, R., Jurukovski, V., DeSaix, J., Choi, J., & Avissar, Y. **Biology: Carbohydrates**. Houston, Texas: OpenStax, 2016.

SANTANA, Izáira Cunha. **Análise dos impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos de construção e demolição em Conceição do Almeida – BA**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Ciências Exatas e Tecnológicas) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Bahia, 2016.

SAVASTANO JR., H., Warden, P. G., & Coutts, R. S. P. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, 22(5), 379-384. doi:10.1016/S0958-9465(00)00034-2, 2000.

SAVASTANO JR., H., Warden, P. G., & Coutts, R. S. P. Evaluation of pulps from natural fibrous material for use as reinforcement in cement product. **Materials and Manufacturing Processes**, 19(5), 963-978. doi:10.1081/AMP-200030684, 2004.

SOROUSHIAN, P., & Marikunte, S. Durability characteristics of cellulose fiber reinforced cement composites. **Paper presented at the American Concrete Institute, ACI Special Publication**, , SP-142 73-89, 1994.

SOROUSHIAN, P., Marikunte, S., & Won, J. Wood fiber reinforced cement composites under wetting-drying and freezing-thawing cycles. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 6(4), 595-611, 1994.

SOUZA, Alessandro Almeida de. **Reciclagem de bituca de cigarro para obtenção de celulose e seu derivado xantato**. 2022. 48 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química Tecnológica) — Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

SOUZA, L.; Junior, N. Adição de Fibras de Celulose (Papel Kraft) no Concreto Verificação da Absorção por Capilaridade. **CALIBRE - Revista Brasileira de Engenharia e Física Aplicada**, ISSN 2526-4192, 2019.

SOUSA REBOUÇAS, A., Lessa Dias, H., Moreira Gomes, I., Amaral Cordeiro, L., Ferreira Viana, L., Soares de Almeida Ramos Miranda, M., Brendel Santos Martins, R., Costa Correia de Souza, R., & Vieira da Silva, A. **Krafterra: Tijolo ecológico**. *Exacta*, Belo Horizonte, v 4, n. 2 - Edição Especial Interdisciplinaridade. Editora UniBH., 43–47, 2011.

TORRES, C. M. M. E., Pedroti, L. G., Silva, C. M., Fernandes, W. E. H., Viana, N. G., Martins, R. O. G., Lima, G. E. S., Sathler, L. M., Andrade, I. K. R., & Caetano, M. A. Use of Alkaline Solid Wastes from Kraft Pulp and Paper Mills, Dregs and Grits in Cement Production. **Minerals, Metals and Materials Series**, Part F7, 843– 852,

2017.

WEI, R., & Sakai, Y. Improving the properties of botanical concrete based on waste concrete, wood, and kraft lignin powder. **Powder Technology**, 397, 117024, 2022.